doi:10.13866/j.azr.2019.04.29

乌兰布和沙漠东北缘防护林内外沙尘暴低空结构特征①

罗凤敏， 高君亮， 辛智鸣， 郝玉光， 葛根巴图，
李新乐， 段瑞兵， 刘 芳
（内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站/中国林业科学研究院沙漠林业实验中心，内蒙古 磴口县 015200）

摘 要：基于内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站近地层(0～50 m)风沙监测塔所收集的8次沙尘暴的沙尘水平通量、垂直通量和风速风向数据，对乌兰布和沙漠东北缘中小尺度条件下的防护林内外沙尘暴过程中风况变化、沙尘分布特征以及防护林对沙尘暴的影响进行研究。结果表明：① 沙尘暴发生过程中，防护林内外风速均随高度增加呈现递增趋势，风速廓线特征遵循幂函数，防护林内外均以W、WNW、NE方向为主，但每个方向所占比例不同。② 防护林外沙尘水平通量及沙尘浓度随高度增高显著减小，其垂直分布特征均符合指数函数关系；防护林内沙尘水平通量及沙尘浓度则随着高度增高缓慢上升，其垂直分布特征均符合幂函数关系。沙尘垂直通量则均随着高度的增高明显减小，其垂直分布特征均符合幂函数关系。③ 沙尘暴经过防护林体系时，风速显著削弱，平均消减31.03%；沙尘水平通量降低298.16 $g \cdot m^{-2}$，垂直通量降低0.37 $g \cdot m^{-2}$，沙尘浓度降低22.48 $g \cdot m^{-2}$。

关键词：防护林；风速；沙尘暴；水平通量；垂直通量；沙尘浓度；乌兰布和沙漠

沙尘颗粒的输送会给人们的生产和生活带来严重威胁，强的沙尘输送即沙尘暴还会造成长期的气候效应[1]。沙尘暴影响范围广，在加剧土地荒漠化进程的同时，又体现出土地荒漠化发展到了一定的程度[2-4]。风是沙尘暴发生必不可少的动力条件，是判定沙尘暴强度的主要指标[5]。而沙尘监测是提供沙尘暴预警，研究防治措施和减轻沙尘灾害带来损失的必要手段[6]，近地面(0～50 m)不仅提供了沙尘释放的源地，也是人们生活及工农业生产的主要空间。因此，加强近地面沙尘的监测，对其发生做出预警，在灾害防治等方面具有重要的现实意义。

关于近地层沙尘暴沙尘释放、输送及沉降的研究主要集中于近地面沙尘释放量的估算、起沙机制以及影响因素，研究方法主要以室内模拟与野外实验相结合为主，研究手段以雷达和卫星监测为主[7-10]。目前，已有的研究主要是针对沙尘暴的宏观特征，而沙尘暴微观结构、沙粒的输沙过程及小环境对沙尘暴过程的影响研究还少见报道。近几年来，国内外学者开始关注气象要素(风速、降水、气温等)及下垫面要素(植被覆盖、土壤湿度、地表固结或疏松程度、沉积物粒径大小)对沙尘暴的影响，并取得了较大进展[11-15]。但国内关于沙漠及周边地区沙尘分布特征的研究主要集中在0～2 m的近地表空间，雷达和卫星对沙尘暴监测主要集中在高空和大尺度范围，而对近地面(0～50 m)范围的沙尘随高度变化的研究相对较少[16-18]。

基于此，本文利用位于乌兰布和沙漠东北缘“内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站”的风沙监测塔(高50 m)8次沙尘暴过程中的风速、风向及沙尘通量数据，分析了沙尘暴发生过程中风速廓线、沙尘通量廓线和沙尘浓度变化特征，阐明低空沙尘暴沙尘水平通量、浓度、垂直通量的垂直分布及水平变化规律，探讨区域内防护林体系对沙尘暴的防护效益。研究结果可揭示乌兰布和沙漠东北缘低空沙尘暴活动特征，也可为区域荒漠化防治及生态防护林建设提供理论依据。

---

① **收稿日期：**2018-09-29； **修订日期：**2018-12-07
基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2016MB003)；中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放基金课题(KLDD-2018-004)；“一带一路”沿线退化土地可持续管理模式研究(IDS2017JY-1)；内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站运行补助(2018-LYPT-DW-140)
作者简介：罗凤敏(1988-)，女，硕士，工程师，研究方向为荒漠化防治. E-mail：lfm359541965@126.com
通讯作者：刘芳. E-mail：liuf98@126.com

1 试验设计与研究方法

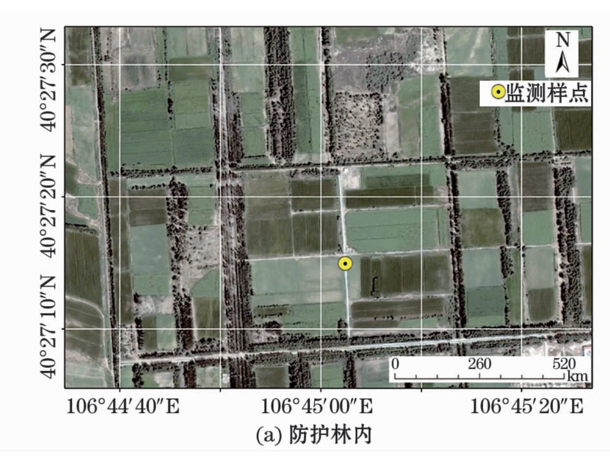
1.1 研究区概况

乌兰布和沙漠是中国北方干旱、半干旱区的过渡带,总面积约 1.0 × 10^4 km^2,海拔 1 028 ~ 1 054 m。研究区位于乌兰布和沙漠东北缘,行政区划隶属于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县。研究区属温带大陆性季风气候,"内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站"多年的观测气象资料统计结果显示:该区平均气温 7.8 ℃,最高气温 39 ℃,最低气温 -29.6 ℃,年均降水量 140.3 mm,年均蒸发量 2 380.6 mm,日照时数 3 200 h,年均风速 3.7 m · s^{-1},瞬时风速最高可达 24 m · s^{-1},年均大风日数 12.5 d,风沙是其主要的自然灾害。天然植被以旱生和超旱生的荒漠植被为主,如:白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)等;人工植被以杨树(*Populus* L.)、梭梭〔*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge〕等沙旱生灌木为主[19-20]。

1.2 研究方法

1.2.1 防护林内外地貌及植被特征 防护林内(40°20′07″N,106°47′39″E):农耕地,地势平坦,周围为农田防护林网(图 1a)。土壤类型主要为壤土和沙壤土。防护林网的树种主要为新疆杨(*Populus alba* L. var. *pyramidalis* Bge.),沿农田灌溉渠道种植,高度 20 ~ 24 m。种植向日葵(*Helianthus annus* L.)和玉米(*Zea mays* L.)两种农作物[20]。

防护林外(40°19′36″N,106°47′32″E):半固定沙地和固定沙地(图 1b),地势起伏不平(相对高差小)。土壤主要为风沙土。植物主要为白刺和油蒿,大部分白刺形成了灌丛沙堆,沙堆大小 (2 ~ 6) m × (4 ~ 8) m,高 1.2 ~ 3.6 m。伴生植物种主要为白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Bge.)和沙米〔*Agriophyllum squrrosum* (L.) Moq.〕[20]。



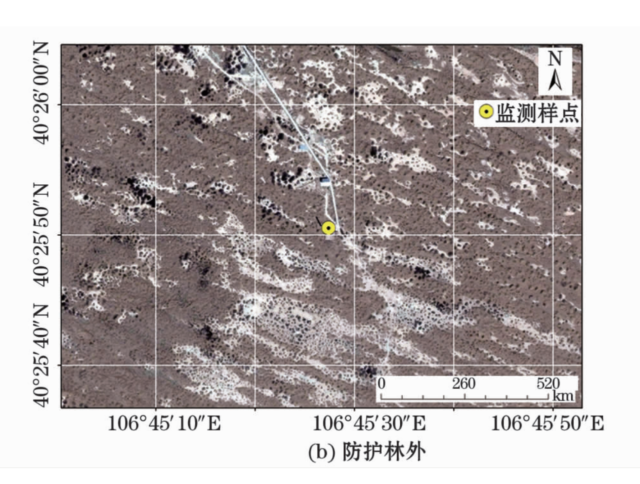


图 1 监测样地影像

Fig. 1 The images of the monitoring plots

1.2.2 沙尘采集装置 防护林内外各有一座 50 m 高的风沙塔,每个风沙塔上安装 1 套沙尘水平通量和垂直降尘量采集器(图 2),采集器距地面高度为 48、44、40、36、32、28、24、20、16、12、8、4、2、1、0.5 m。沙尘通量收集采用董治宝等[21]设计的采集器,该采集器能够跟踪风向变化收集沙尘,收集口为 20 mm × 50 mm;沙尘降尘量收集装置为直径 15 cm、高 30 cm 的圆柱形平底玻璃容器。在距地面高度 48、36、24、16、12、8、4、2、1 m 各安装 1 个 Windsonic 二维超声风速风向传感器,启动风速 0.01 m · s^{-1},精度 12 m · s^{-1}时,量程为 0 ~ 60 m ·

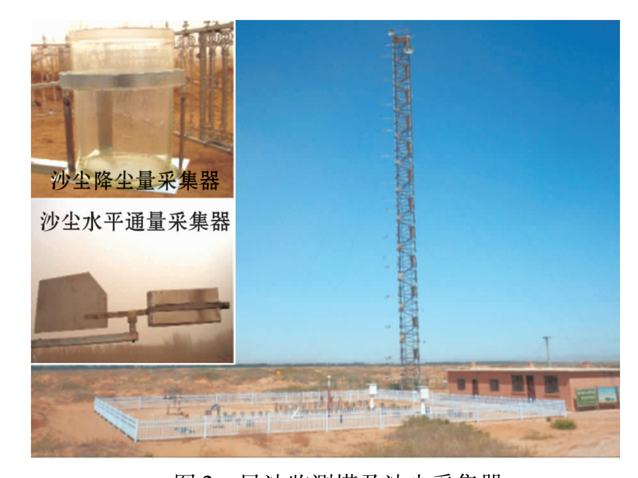


图 2 风沙监测塔及沙尘采集器

Fig. 2 The sandcastle and observation devices of wind-blowing sand

s^{-1}(0°~359°),分辨率为0.01 m·s^{-1}(1°)。

沙尘暴结束后1 d内完成沙尘采集工作,为保证收集样品处于自然风干状态,采样过程需避开降水。本文所用沙尘数据为2017年5月至2018年5月收集的8次沙尘暴数据;风速风向数据为该时段内自动记录,数据采集频率为10 min。

1.3 数据计算方法

沙尘水平通量和降尘量观测采用梯度法。为了避免人为误差,沙尘水平通量采集器观测前后的质量差作为沙尘水平通量。采用干集尘方式可以使降尘接近自然界实际的风沙沉积过程。

本文所用沙尘数据为8次沙尘暴的平均值,风速数据分别为年平均值和8次沙尘暴发生过程中风速平均值,风向数据为8次沙尘暴发生过程中风向平均值。

(1) 沙尘水平通量和降尘量通过以下公式计算:

$$M_H = W_H / ab \quad (1)$$

$$M_V = W_V / \pi r^2 \quad (2)$$

式中:M_H为水平通量(g·m^{-2});W_H为集尘器内收集的沙尘净重(g);a为集尘器集尘口宽度(mm);b为集尘器集尘口高度(mm);M_V为降尘量(g·m^{-2});W_V为集尘缸内接收的沙尘净重(g);r为集尘缸缸口半径(cm)。

(2) 沙尘浓度计算公式如下[22]:

$$C_{(x)} = \frac{Q_{(x)}}{V_{(x)} TA} \quad (3)$$

式中:$C_{(x)}$为高度x处的沙尘浓度(g·m^{-3});$Q_{(x)}$为高度x处收集到的总沙尘量(g·m^{-2});$V_{(x)}$为高度x处的平均风速(m·s^{-1});T为沙尘暴过程的持续时间(s);A为取样口面积(m^2)。

(3) 将2017年5月至2018年5月的观测高度为12 m的原始风速、风向数据,以10 min为统计单位,参考相关研究[23],计算每月风速≥5 m·s^{-1}的起沙风的平均风速、最大风速及起沙风频率。统计计算N、NNE、NE、ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SW、SSW、WSW、W、WNW、NW和NNW 16个方位起沙风频率,为了更好地表述风速风向分布特征,每个方位的起沙风均按照5 m·s^{-1}≤V<7 m·s^{-1},7 m·s^{-1}≤V<9 m·s^{-1},9 m·s^{-1}≤V<11 m·s^{-1},V≥11 m·s^{-1} 4个风速段进行分段统计,根据以上统计分析数据绘制起沙风玫瑰图。

采用Excel 2010软件分析沙尘、风速风向数据,利用Origin 8.5软件绘制风向玫瑰图。

2 结果与分析

2.1 风速廓线及风玫瑰图

2.1.1 风速廓线 分析全年风速廓线可知(图3),防护林外风速明显大于防护林网内风速,风速(V)随高度(h)增加均呈现递增趋势,防护林外风速廓线拟合方程为$V=1.49h^{0.37}$($R^2=0.97$,$P<0.01$),防护林内风速廓线拟合方程为$V=0.98h^{0.46}$($R^2=0.99$,$P<0.01$)。沙尘暴发生过程中防护林内外风速廓线与全年风速廓线趋势一致,也可用幂函数表示,防护林外风速廓线拟合方程为$V=3.97h^{0.22}$($R^2=0.99$,$P<0.01$),防护林内风速廓线拟合方程为$V=1.89h^{0.38}$($R^2=0.97$,$P<0.01$)。

沙尘暴发生过程中,9个不同的高度上,防护林外的平均风速均大于防护林内,二者差值介于0.88~2.34 m·s^{-1},随着高度增加,二者差值逐渐减小,风速消减层主要在24 m以下,沙尘暴经过防护林时,不同高度上风速消减范围为9.26%~58.70%,平均消减31.03%,风速消减最大值在1 m

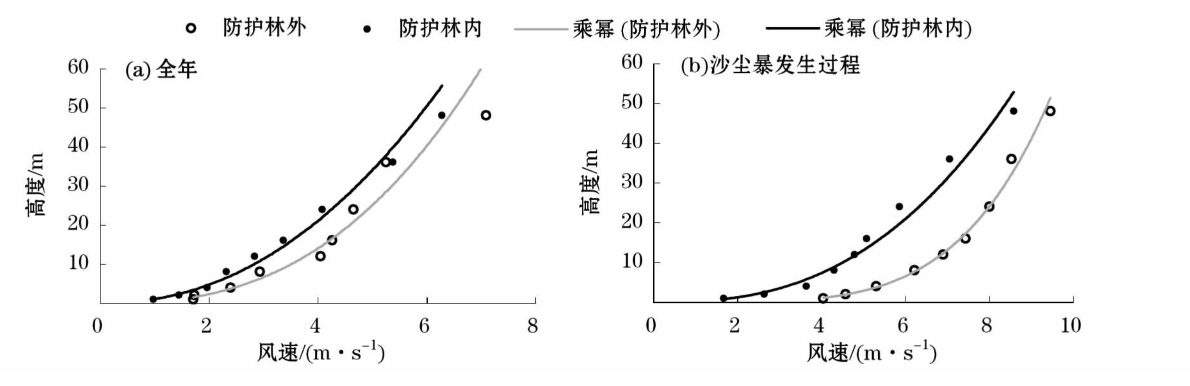


图3 全年及沙尘暴发生过程防护林内外风速廓线

Fig. 3 The wind velocity profiles for inside and outside the shelterbelt in whole years and during sandstorms

处(58.70%)。表明农田防护林对于沙尘暴具有显著防风功能,当沙尘暴经过防护林时,近地层气流流场发生改变,因为林带的阻挡使得气流被迫抬升,从而减少进入防护林内的气流,这在一定程度上减轻了沙尘暴对防护林内部农作物的侵害。

2.1.2 防护林内外风玫瑰图 风速决定近地层风沙运动,但风向决定风沙运动的方向,对风沙运动而言具有同等重要作用。通过对乌兰布和沙漠东北缘防护林内外风向资料的统计分析可知(图4),沙尘暴发生过程中,防护林内外主要以W、WNW、NE方向为主,但每个方向所占比例不同。防护林内3个方向分别占46.53%、21.54%和15.34%,防护林外3个方向分别占28.59%、22.99%和25.73%。防护林内外的风向基本一致,但防护林的存在改变了近地层气流流场,防护林内W方向起沙风所占比例较大,而防护林外3个风向所占比例较为均匀。

同时,防护林还能明显削弱风速,防护林外$V \geq 11\ m \cdot s^{-1}$的起沙风频率为20.36%,防护林内$V \geq 11\ m \cdot s^{-1}$的起沙风频率仅为5.61%,起沙风频率降低了14.75%;防护林外$9\ m \cdot s^{-1} \leq V < 11\ m \cdot s^{-1}$的起沙风频率为20.79%,防护林内$9\ m \cdot s^{-1} \leq V < 11\ m \cdot s^{-1}$的起沙风频率仅为15.01%,起沙风频率降低了5.78%;而$5\ m \cdot s^{-1} \leq V < 7\ m \cdot s^{-1}$和$7\ m \cdot s^{-1} \leq V < 9\ m \cdot s^{-1}$的风速均是防护林内大于防护林外。

当沙尘暴经过防护林体系时,防护林体系作为高大的粗糙元,一部分气流被抬升,在林冠上方形成速度相对较高的"自由流",越过林带后又形成下沉气流,在背风区一定距离处向各个方向扩散;另一部分气流进入林带内,由于受树体的阻挡和摩擦,气流在分散的同时被消耗掉大量的能量,从而在林冠层下面形成速度较低的"束缚流"。因此,防护林内部高风速起沙频率降低,低风速频率相对增加。

2.2 沙尘通量

2.2.1 沙尘水平通量 沙尘在风力作用下进行输送,输送过程中沙尘通量随着高度的变化产生差异。由图5可知,防护林外围沙尘水平通量(M_H)随高度(h)增高显著减小,水平通量随高度的分布特征符合指数函数关系$M_H = ae^{bh}$,拟合方程为$M_H = 760.55$

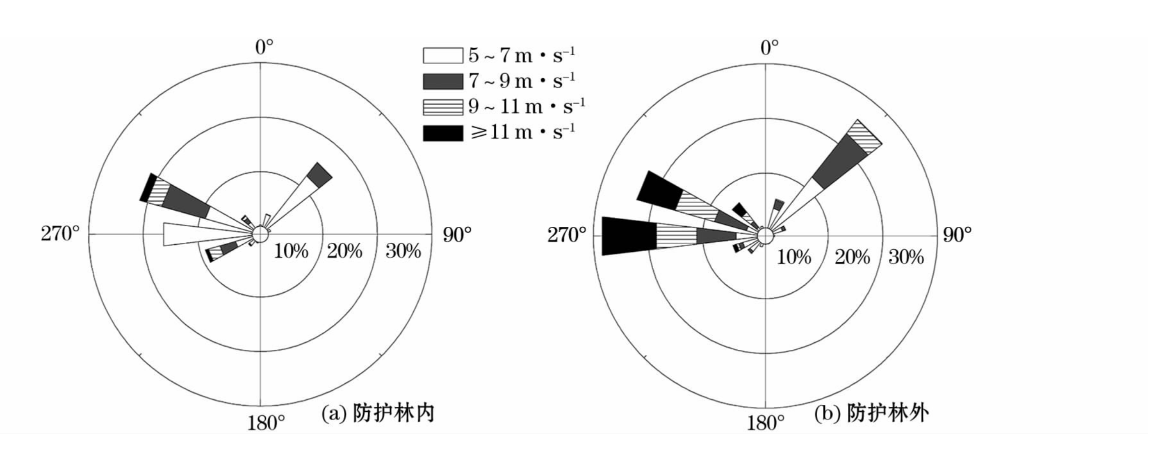


图4 沙尘暴发生过程中防护林内外起沙风玫瑰图

Fig. 4 Sand-driving wind roses for inside and outside the shelterbelt during sandstorms

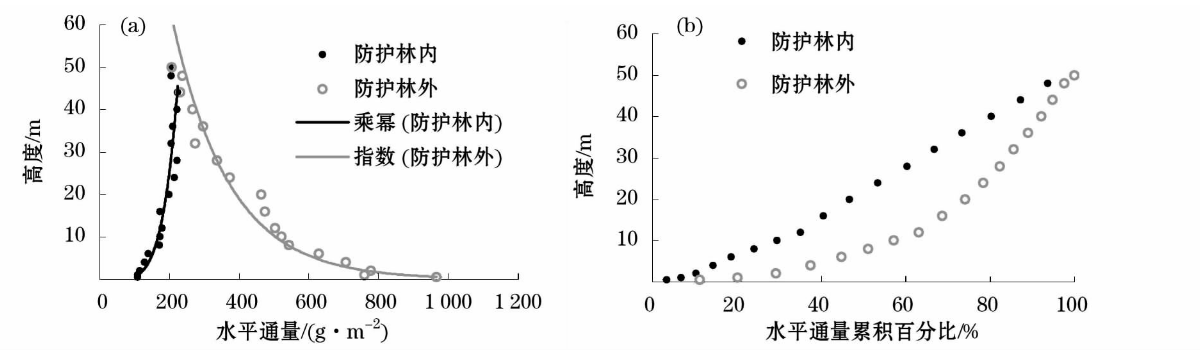


图5 沙尘水平通量廓线及累计百分比

Fig. 5 Profiles and cumulative percentages of horizontal wind-blowing sand flux

$e^{-0.03}h$（$R^2=0.96, P<0.01$）；而防护林内部沙尘水平通量则随着高度的增高呈现缓慢上升的趋势，但变化幅度不大，在 107.88～223.30 g·m^{-2}，其随高度的分布特征符合幂函数关系 $M_H=ah^b$，拟合方程为 $M_H=110.58h^{0.18}$（$R^2=0.92, P<0.01$）。此现象表明，沙尘暴发生时，防护林外围的沙尘水平通量主要从低层通过，在总输沙量大致相同的条件下，防护林体系的存在改变了低层气流的路径，随着风速增大，低层气流层中搬运的沙量减少，而上层输沙量则相应增加，因此，沙尘主要从高空通过[24]。

沙尘暴通过防护林时，沙尘水平通量降低，防护林外围 0～50 m 单次沙尘暴过程的平均沙尘水平通量为 475.51 g·m^{-2}，而防护林内部只有 177.35 g·m^{-2}，沙尘浓度降低了 298.16 g·m^{-2}，并且随着高度的增高，二者差值逐渐减小，呈现出逐渐重合的趋势。从水平通量累计百分比分析，随着高度的增加，沙尘水平通量累计百分比增加幅度逐渐减小，0～24 m 高度层防护林外围沙尘水平通量累计百分比增加幅度较大，而防护林内部相对较小；36～48 m 高度层防护林内部沙尘水平通量累计百分比增加幅度逐渐增加，而防护林内部则逐渐趋于平稳；其中防护林外围 78.4% 的沙尘水平通量集中在 24 m 以内，而防护林内部 24 m 以内只占 53.5%。以上数据分析表明，随着高度增加，下垫面状况对沙尘暴沙尘水平通量的影响逐渐减弱。

2.2.2 沙尘垂直通量　由图 6 可知，防护林内外沙尘垂直通量（M_V）均随着高度（h）的增高呈现明显减小趋势，降尘量随高度的分布特征均符合幂函数关系 $M_V=ah^b$。其中，防护林外围水平通量随高度变化的拟合方程为 $M_V=4.88h^{-0.40}$（$R^2=0.93, P<0.01$），防护林内的拟合方程为 $M_V=4.11h^{-0.45}$（$R^2=0.76, P<0.01$）。

防护林内外在 24 m 以下的沙尘垂直通量均呈逐渐减小的趋势，并且变化幅度相对较大，在 24 m 以上防护林外的垂直通量持续减小，但是变化幅度逐渐减小，而防护林内的垂直通量在 24 m 以上呈现逐渐增加的趋势，但是变化幅度较小。防护林外围 0～50 m 内单次沙尘暴过程的平均沙尘垂直通量为 2.22 g·m^{-2}，而防护林内部只有 1.85 g·m^{-2}，二者的差值也随着高度的增高而逐渐减小，呈现出逐渐重合的趋势。防护林内的垂直通量廓线拟合方程的相关系数相对防护林外较小，由此可知防护林的存在能够显著影响沙尘的输送路径及分布特征。

从垂直通量累计百分比分析，随着高度的增加，沙尘垂直通量累计百分比增加幅度逐渐减小，但防护林内部和防护林外围增加幅度基本一致，二者 80% 的沙尘垂直通量均集中在 28 m 以内。由此说明，沙尘暴经过防护林体系时，防护林对不同高度的沙尘垂直通量分配比例没有太大影响。

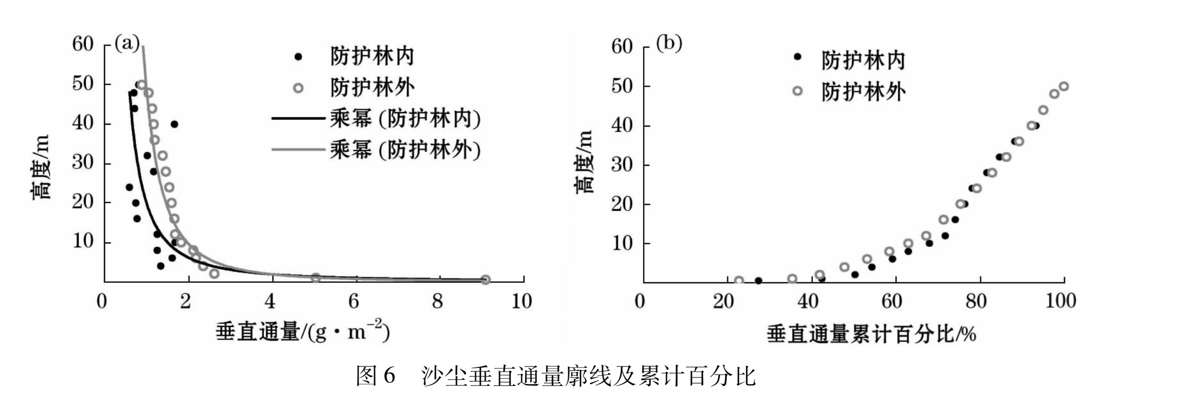


图 6　沙尘垂直通量廓线及累计百分比

Fig. 6　Profiles and cumulative percentages of vertical wind-blowing sand flux

2.2.3 沙尘浓度　沙尘暴发生过程中，防护林内外沙尘浓度（C）均呈现出随高度（h）增高而减小的趋势（图 7），防护林外沙尘浓度随高度的分布特征为指数函数 $C=65.50e^{-0.05h}$（$R^2=0.92, P<0.01$），防护林内沙尘浓度随高度的分布特征为幂函数 $C=21.95h^{-0.20}$（$R^2=0.76, P<0.01$）。

防护林外沙尘浓度随着高度增加逐渐减小，在 1 m 处最大（83.79 mg·m^{-3}），8 m 处迅速下降到 44.82 mg·m^{-3}，12～24 m 高度层为 24.64～14.00 mg·m^{-3}，36～48 m 高度层平缓下降；防护林内沙尘浓度在 1 m 处最大（25.16 mg·m^{-3}），4～48 m 高度层平缓下降，沙尘浓度为 8.37～15.42 mg·m^{-3}。防护林外沙尘浓度平均值为 37.24 mg·m^{-3}，防护林内仅为 14.76 mg·m^{-3}，随着高度的增加，二者差值逐渐减小，并且有重合的趋势，此现象说明沙尘浓

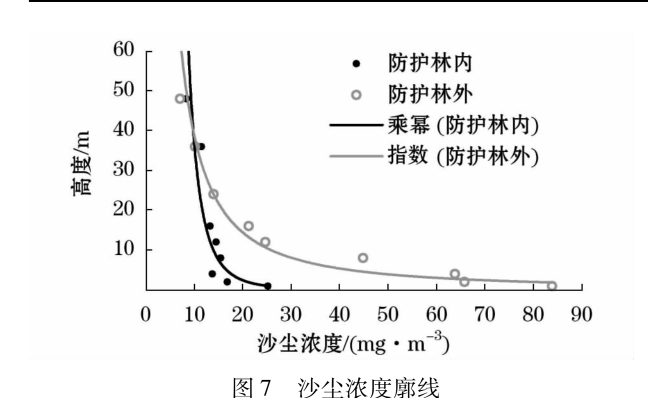


图 7　沙尘浓度廓线

Fig. 7　Profiles of wind-blowing sand concentration

度在高空受下垫面状况影响较小。

3　讨 论

3.1　沙尘暴发生过程中风速分布特征

本文基于风沙监测塔实测的风速风向数据,绘制了乌兰布和沙漠东北缘沙尘暴发生过程中防护林内外风速廓线。研究结果表明,二者风速均随高度增高逐渐增大。风速廓线特征用幂函数来表示,且均达到极显著水平($P<0.01$)。本文研究结果与民勤绿洲在不同下垫面(沙漠、沙漠－绿洲过渡带、绿洲)的风速分布特征一致,在 0～50 m 高度随高度增加并且遵循幂函数[22],巴丹吉林沙漠 3 种下垫面(荒漠区、绿洲边缘和绿洲内部)近地面 50 m 沙尘暴风速也有相似的结果,均是随高度遵循幂函数关系递增[5]。而非沙尘暴过程中的风速廓线也得到了相似的结果,腾格里沙漠边界层的风速在 0～50 m 高度随着高度增高而逐渐增加[25]。

3.2　沙尘暴发生过程中沙尘通量分布特征

沙尘水平通量是沙尘输送数值模拟的必要参数,大气降尘又具有重要的环境指征意义,是大气污染监测的参考性指标,因此,对二者的研究具有重要意义。近年来,近地层的沙尘通量受到广泛关注,主要通过野外监测和风洞模拟等方法对其开展相关研究,进而得出沙尘分布特征[1]。已有研究主要集中于近地表(0～2 m)范围内,近地层(0～50 m)相对较少,加之受不同区域环境等因素的影响,使得研究结果产生了一定差异。腾格里沙漠的近地层沙尘通量与高度之间的关系遵循指数函数[25－29],民勤绿洲的沙尘通量与高度遵循幂函数[22],而塔克拉玛干沙漠则上述两种函数关系都存在[26－30],并且民勤绿洲内沙尘水平通量随着高度的增加平缓增大,而其他下垫面类型则随高度的增高逐渐减小。本文沙尘通量变化趋势与赵明等[22]的研究结果基本一致,只有乌兰布和沙漠东北缘防护林外沙尘水平通量存在差异,其随高度增加呈指数函数增大,防护林外的沙尘水平通量及垂直通量随高度增加均呈幂函数增大。以上研究只是模型参数有差异,沙尘通量分布特征一致。因此,分析认为差异的产生可能是监测仪器型号和监测时间不一致因素所导致[31]。由此可知,在今后的研究工作中,应该尽可能的选择监测时间以及频率一致的沙尘监测仪器开展长期、连续的监测,以便对不同区域的沙尘通量进行比较分析,为今后的防沙治沙工作提供基础数据。

3.3　下垫面对沙尘暴的影响

沙尘暴发生过程中沙尘水平通量和垂直通量与下垫面属性(土壤、地形地貌、植被、地表粗糙度)密切相关,这些因素都会对沙尘暴发生过程中的风速廓线以及沙尘颗粒的运移过程产生影响,从而影响沙尘通量分布规律[14,32－33]。乌兰布和沙漠东北缘防护林内外风速风向和沙尘通量都存在明显差异,防护林体系能够明显降低风速并减弱通过防护林的沙尘通量,防护林带能够改变林网内的小气候,对林网内的湍流交换具有减弱作用,对抑制沙尘垂直输送具有重要作用,所以,防护林网内的沙尘质量较少[14－15];这与民勤地区 3 种不同类型下垫面沙尘水平通量和垂直通量的垂直分布特征相似[22]。目前该方面的相关研究只考虑了下垫面的综合状况对沙尘暴的影响,而其各分量因子对沙尘暴影响的权重还未见报道,还需进一步分析研究,这样能更好地量化下垫面状况对沙尘暴的影响,进而提出更为有效的防沙治沙措施。

4　结 论

(1) 沙尘暴发生过程中,在垂直梯度上,乌兰布和沙漠东北缘防护林内外风速均随高度增加呈现递增趋势,风速廓线特征遵循幂函数 $V=ah^b$,随着高度的增加,二者差值逐渐减小,风速消减层主要在 24 m 以下;在水平梯度上,沙尘暴经过防护林体系时风速显著削弱,平均消减 31.03%,风速消减最大值在 1 m 处(58.70%)。

(2) 沙尘暴发生过程中,防护林内外主要以 W、WNW、NE 方向为主,但每个方向所占比例不同,防护林内 3 个方向分别占 46.53%、21.54% 和 15.34%,防护林外 3 个方向分别占 28.59%、

22.99%和25.73%。沙尘暴经过防护林时,高风速起沙风频率减弱,而低风速起沙风频率相应增加。

(3) 防护林外沙尘水平通量随高度增高显著减小,其垂直分布特征符合指数函数关系,防护林内沙尘水平通量则随着高度的增高呈现缓慢上升的趋势,但变化幅度较小(107.88 ~223.30 $g \cdot m^{-2}$),其垂直分布特征符合幂函数关系;防护林内外沙尘垂直通量均随着高度的增高呈现明显的减小趋势,其垂直分布特征均符合幂函数关系。沙尘暴通过防护林时,沙尘水平通量降低了298.16 $g \cdot m^{-2}$,垂直通量降低了0.37 $g \cdot m^{-2}$。防护林外围78.4%的沙尘水平通量集中在24 m以内,而防护林内部24 m以内只占53.5%,而二者80%的沙尘垂直通量集中在28 m以内。

(4) 防护林内外沙尘浓度均呈现出随高度增高而逐渐减小的趋势,防护林外沙尘浓度垂直分布特征符合指数函数关系,防护林内沙尘浓度垂直分布特征符合幂函数关系;沙尘暴通过防护林时,平均沙尘浓度降低了22.48 $g \cdot m^{-2}$。

参考文献(References):

〔1〕 Mctainsh G,Strong C. The role of aeolian dust in ecosystems〔J〕. Geomorphology,2007,89(1-2):39-54.

〔2〕 孙军,李泽椿. 西北地区沙尘暴预报方法的初步研究〔J〕. 气象,2001,27(1):19-24.〔Sun Jun,Li Zechun. A tentative study of the forecasting method of the dust storms in the Northwest of China〔J〕. Meteorological Monthly,2001,27(1):19-24.〕

〔3〕 Shao Y,Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring〔J〕. Global and Planetary Change,2006, 52(1):1-22.

〔4〕 李璠,徐维新,祁栋林,等. 1961—2015年青海沙尘天气时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):412-417.〔Li Fan,Xu Weixin,Qi Donglin, et al. Spatiotemporal characteristics of dust weather in Qinghai during the period of 1961-2015〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):412-417.〕

〔5〕 詹科杰,赵明,方峨天,等. 民勤地区沙尘暴近地面风速特征及其与环境因子的关系〔J〕. 干旱区资源与环境,2009,23(9):100-105.〔Zhan Kejie,Zhao Ming,Fang Etian,et al. The wind speed characteristics of near-surface vertical gradient of 50 m in sandstorm process in 2006〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2009,23(9):100-105.〕

〔6〕 周成龙,杨兴华,钟昕洁,等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘天气特征〔J〕. 干旱区研究,2017,34(2):324-329.〔Zhou Chenglong, Yang Xinghua,Zhong Xinjie,et al. ,Dust weather in hinterland of the Taklamakan Desert〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(2): 324-329.〕

〔7〕 Zhang K C,Qu J J,Zu R P,et al. Environmental characteristics of sandstorm of Minqin Oasis in China for recent 50 years〔J〕. Journal of Environmental Sciences,2005,17(5):857-860.

〔8〕 Xuan J,Sokolik I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China〔J〕. Atmospheric Environment, 2002,36(31):4 863-4 876.

〔9〕 Husar R B,Tratt D M,Schichtel B A,et al. Asian dust events of April 1998〔J〕. Journal of Geophysical Research D: Atmospheres, 2001,106(D16):18 317-18 330.

〔10〕 车慧正,张小曳,李杨,等. DPM模型计算中国北方沙漠地区粉尘释放通量〔J〕. 干旱区资源与环境,2005,19(5):49-55.〔Che Huizheng,Zhang Xiaoye,Li Yang,et al. Calculations of dust emission flux in northern deserts of China by DPM model〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2005,19(5):49-55.〕

〔11〕 Reynolds R L,Yount J C,Reheis M,et al. Dust emission from wet and dry playas in the Mojave Desert, USA〔J〕. Earth Surface Processes & Landforms,2007,32(12):1 811-1 827.

〔12〕 Qian Y B,Wu Z N,Zhang L Y,et al. Ground-surface conditions of sand-dust event occurrences in the Southern Junggar Basin of Xinjiang,China〔J〕. Resources Science,2006,28(5):185-189.

〔13〕 李宁,杜子璇,许英军,等. 土壤湿度与风速对沙尘暴发生的贡献程度分析〔J〕. 自然灾害学报,2007,16(4):1-5.〔Li Ning, Du Zixuan,Xu Yingjun,et al. A contribution of soil moisture and wind speed to occurrence of dust storms〔J〕. Journal of Natural Disasters,2007,16(4):1-5.〕

〔14〕 宋阳,刘连友,严平,等. 中国北方5种下垫面对沙尘暴的影响研究〔J〕. 水土保持学报,2005,19(6):15-18.〔Song Yang,Liu Lianyou,Yan Ping,et al. Study on the influence of five kinds of underlying matches on sandstorm in North China〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(6):15-18.〕

〔15〕 魏倩,隆霄,田畅,等. 民勤一次沙尘暴天气过程的近地层气象要素多尺度特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(6):1 352-1 362.〔Wei Qian,Long Xiao,Tian Chang,et al. Multiscale meteorological characteristics during a sandstorm in Minqin〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(6):1 352-1 362.〕

〔16〕 李晋昌,董治宝,王训明. 中国北方东部地区春季降尘量及其环境意义〔J〕. 中国沙漠,2008,28(2):195-201.〔Li Jinchang, Dong Zhibao,Wang Xunming. Amount of spring dustfall and its environmental significance in east part of Northern China〔J〕. Journal of Desert Research,2008,28(2):195-201.〕

〔17〕 杨兴华,何清,霍文,等. 沙漠地区不同下垫面近地表沙尘水平通量研究〔J〕. 干旱区研究,2014,31(3):564-569.〔Yang Xinghua,He Qing,Huo Wen,et al. Near-surface horizontal sand-dust flux over different underlying surfaces in a desert〔J〕. Arid Zone Research,2014,31(3):564-569.〕

〔18〕 张锦春,赵明,方峨天,等. 民勤沙尘源区近地面降尘特征研究〔J〕. 环境科学研究,2008,21(3):17-21.〔Zhang Jinchun, Zhao Ming,Fang Etian,et al. Study on character of dustfull near the ground in Minqin dust source regions〔J〕. Research of Environ-

mental Sciences,2008,21(3):17 -21.〕

〔19〕 高君亮,郝玉光,丁国栋,等.乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估〔J〕.干旱区资源与环境,2013,27(12):41 -46.〔Gao Junliang,Hao Yuguang,Ding Guodong,et al. Primary assessment on the wind-breaking and sand-fixing function of the vegetation and its value in Ulan Buh Desert ecosystem〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(12):41 -46.〕

〔20〕 罗凤敏,辛智鸣,高君亮,等.乌兰布和沙漠东北缘近地层风速和降尘量特征〔J〕.农业工程学报,2016,32(24):147 -154.〔Luo Fengmin,Xin Zhiming,Gao Junliang,et al. Characteristics of near-surface wind speed and sand-dust flux at northeast edge of Ulan Buh Desert〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2016,32(24):147 -154.〕

〔21〕 董治宝,赵爱国,邓俭. 沙尘水平通量测量器:中国,ZL0313453414〔P〕.2008.〔Dong Zhibao,Zhao Aiguo,Deng Jian. The Surveyor of Horizontal Sand-Dust Flux:China,ZL0313453414〔P〕.2008.〕

〔22〕 赵明,詹科杰,杨自辉,等.民勤沙漠 -绿洲低空沙尘暴结构特征研究〔J〕.中国科学:地球科学,2011,41(2):234 -242.〔Zhao Ming,Zhan Kejie,Yang Zihui,et al. Characteristics of the lower layer of sandstorms in the Minqin desert-oasis zone〔J〕. Science China:Earth Sciences,2011,41(2):234 -242.〕

〔23〕 吴正.风沙地貌学〔M〕.北京:科学出版社,1987:38 -39.〔Wu Zheng. Aeolian Geomorphology〔M〕. Beijing:Science Press,1987:38 -39.〕

〔24〕 冯大军,倪晋仁,李振山.风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究〔J〕.地理学报,2007,62(11):1 194 -1 203.〔Feng Dajun,Ni Jinren,Li Zhenshan. Vertical mass flux profiles of different grain size groups in aeolian sand transport〔J〕. Acta Geographica Sinica,2007,62(11):1 194 -1 203.〕

〔25〕 张正偲,董治宝,赵爱国,等.沙漠地区风沙活动特征——以中国科学院风沙观测场为例〔J〕.干旱区研究,2007,24(4):550 -555.〔Zhang Zhengcai,Dong Zhibao,Zhao Aiguo,et al. Features of sand drift movement in desert:A case study at sand drift observation station of Chinese Academy of Sciences〔J〕. Arid Zone Research,2007,24(4):550 -555.〕

〔26〕 杨东亮,王雪芹,胡永锋,等.风沙流输沙通量垂向分布研究——以塔克拉玛干沙漠南缘流沙地表风沙流观测为例〔J〕.中国沙漠,2012,32(3):631 -639.〔Yang Dongliang,Wang Xueqin,Hu Yongfeng,et al. Vertical distribution of aeolian sand mass flux based on field observation at southern rim of the Taklimakan Desert〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(3):631 -639.〕

〔27〕 何清,杨兴华,艾力·买买提依明,等.塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究——试验介绍与观测结果初报〔J〕.中国沙漠,2011,31(2):315 -322.〔He Qing,Yang Xinghua,Ali Mamtimin,et al. Observation of dust emission by wind erosion in Taklimakan Desert:Field experiment and preliminary report〔J〕. Journal of Desert Research,2011,31(2):315 -322.〕

〔28〕 杨兴华,李红军,何清,等.塔克拉玛干沙漠荒漠过渡带春季风沙活动特征——以肖塘为例〔J〕.中国沙漠,2012,32(4):915 -920.〔Yang Xinghua,Li Hongjun,He Qing,et al. Blown sand activities in spring in the desert transitional zone of the Taklimakan Desert:A case in Xiaotang area〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(4):915 -920.〕

〔29〕 杨兴华,何清,霍文,等.塔克拉玛干沙漠南缘风沙跃移运动研究——以策勒为例〔J〕.中国沙漠,2012,32(4):910 -914.〔Yang Xinghua,He Qing,Huo Wen,et al. Sand saltation in the south margin of the Taklimakan Desert:A case study in Cele County〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(4):910 -914.〕

〔30〕 Yang X H,He Q,Ali Mamtimin,et al. A field experiment on dust emission by wind erosion in the Taklimakan Desert〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2012,26(2):241 -249.

〔31〕 Wang X M,Dong Z B,Zhang J W,et al. Modern dust storms in China:An overview〔J〕. Journal of Arid Environments,2004,58(4):559 -574.

〔32〕 Liu X D. Analyses of the spring dust storm frequency of Northern China in relation to antecedent and concurrent wind,precipitation,vegetation,and soil moisture conditions〔J〕. Journal of Geophysical Research,2004,109(D16):D16210.

〔33〕 邓兴耀,姚俊强,刘志辉.基于 GIMMS-NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化〔J〕.干旱区研究,2017,34(1):10 -19.〔Deng Xingyao,Yao Junqiang,Liu Zhihui. Spatiotemporal dynamic change of vegetation coverage in arid regions in Central Asia based on GIMMS-NDVI〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(1):10 -19.〕

Low-Altitude Structure of Sandstorms for Inside and Outside the Shelterbelt in the Northeast Marginal Zone of the Ulan Buh Desert

LUO Feng-min, GAO Jun-liang, XIN Zhi-ming, HAO Yu-guang, GE Gen-batu, LI Xin-le, DUAN Rui-bing, LIU Fang

(*Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station/Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou* 015200, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: In this paper, the data of horizontal and vertical sand-dust flux and the annual wind speed and direction during eight sandstorms, collected from the sandwatch tower near the surface layer (0 – 50 cm) of Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, were used. The purposes of the study were to analyze the variations of sand-driving wind regime, distribution of wind-blowing sand and the effect of shelterbelt on sandstorms on small scale in the northeast marginal zone of the Ulan Buh Desert. The results were as follows: ① The average wind speed inside and outside the shelterbelt increased with the increase of height, the wind speed profiles during sandstorms could be expressed by the power exponential function, the prevailing wind directions inside and outside the shelterbelt were W, WNW and NE, but their proportions were different. ② The horizontal wind-blowing sand flux and the sand-dust concentration outside the shelterbelt decreased with the increase of height. The distribution of wind-blowing sand accorded with the exponential function, the horizontal wind-blowing sand flux and sand-dust concentration inside and outside the shelterbelt increased slowly with the increase of height, and the distribution of wind-blowing sand accorded with the power exponential function. The vertical wind-blowing sand flux inside and outside the shelterbelt decreased significantly with the increase of height, and the distribution of wind-blowing sand accorded with the power exponential function. ③ When sandstorm passed through the shelterbelt system, the wind speed was significantly decreased with an average reduction of 31.03%, while the horizontal and vertical fluxes of wind-blowing sand were reduced by 298.16 $g \cdot m^{-2}$ and 0.37 $g \cdot m^{-2}$ respectively, and the concentration of wind-blowing sand was decreased by 22.48 $g \cdot m^{-2}$.

Key words: shelterbelt; wind speed; sandstorm; horizontal flux; vertical flux; wind-blowing sand concentration; Ulan Buh Desert